

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19360072  
 研究課題名（和文） 摩擦理論構築のためのナノメートルスケール境界膜を含めた表面近傍の強度測定

研究課題名（英文） Shear strength measurements of vicinity of surface with nano-scale boundary film for establishment of friction theory

## 研究代表者

中原 綱光 (NAKAHARA TSUNAMITSU)  
 東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：80001625

## 研究成果の概要：

摩擦係数に及ぼす粗さの影響は3つの粗さパラメーターの内の突起密度  $D_{sum}$  だけで決まることを理論的に明らかにした。また、エンジン油に酸化防止と摩耗防止のために用いられている ZnDTP の添加剤を用いて、ボール・オン・ディスク摩擦試験機によりしゅう動させて数十ナノメートルの摩擦反応被膜を形成させ、その薄膜のせん断強度測定を行い、プライマリ ZnDTP の反応膜の方がセカンダリの反応膜よりせん断強度が高いことを明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2008年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
年度			
年度			
年度			
総計	10,200,000	3,060,000	13,260,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー、摩擦係数、固体潤滑、境界潤滑、固体接触、表面粗さ、AFM、ナノインデント

## 1. 研究開始当初の背景

クーロンが実験により得られた経験則として摩擦法則を提示してから225年経ち、約50年前にようやく定性的に理論的説明が与えられたが、その後未だに摩擦係数を定量的に予測する手段が確立されていない。今日までに、実験により求められる摩擦係数の膨大なデータベースが得られているが、それを用いても定量的予測はできないのが現状である。その原因は、摩擦係数は表面粗さ突起の接触表面付近のナノからマイクロメータス

ケールの機械的物性（材料強度）に依存しており、摩擦係数自身は物性値ではないことによる。そして、近年のナノテクノロジーによって表面分析やコーティング薄膜の強度測定が耐摩耗性の観点から盛んに行われているが、摩擦係数に結びつけた表面付近の強度測定がほとんど行われていないのが現状である。

## 2. 研究の目的

そこで、本研究は、酸化膜やその他の反応膜といった境界膜を考慮した、マイクロメー

タスケールの表面粗さ突起の弾塑性接触理論に基づいた摩擦理論を構築し、その理論に必要な表面近傍のナノからマイクロメートルスケールの材料強度を測定する技術を確認し、その測定値を用いた摩擦理論により推定された摩擦係数と摩擦試験で得られた摩擦係数を比較検討することにより定量的摩擦理論の深化を図ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

- (1) ナノインデントを用いて、粗さ突起の平均半径程度の深さ方向の硬さ分布をナノメートルの分解能で計測する。
- (2) 上記1の計測結果より粗さ突起の接触における有効硬さを算出する。
- (3) 既存の AFM の接触子を、粗さ突起の平均半径程度のダイヤモンドの半球面接触子に変更する改造を行い、ナノメートルスケール境界膜のせん断強度を計測する。
- (4) 上記2, 3の測定結果と表面粗さ突起の弾塑性接触理論を用いて、摩擦係数を推定する
- (5) 同じ状態の表面について摩擦試験で計測された摩擦係数と上記4までの作業で推定された摩擦係数を比較検討する。
- (6) 上記1～5のプロセスを種々の摩擦材料、潤滑油、しゅう動条件について行う。

### 4. 研究成果

(1) 摩擦係数と3つの粗さパラメータの関係 本研究の出発点になる代表者の摩擦理論に用いられている表面粗さの3つのパラメータ（粗さ突起頂点高さの標準偏差  $\sigma_{sum}$ 、単位面積当たりの粗さ突起密度  $D_{sum}$  および粗さ突起頂点の平均曲率半径  $R_{sum}$ ）が独立ではないので、摩擦係数と粗さの関係をより明確にすることを試みた。その際、相関長というパラメータに着目し、3つの粗さパラメータを粗さ突起頂点高さの標準偏差  $\sigma_{sum}$  および相関長で表すことにより、摩擦係数は粗さの関係は、図1に示すように、突起密度  $D_{sum}$  あるいは相関長だけで決まることを明らかにした。次に、摩擦係数  $\mu$  と粗さ突起密度  $\eta$  の関係に及ぼす面圧、被膜厚さおよび被膜と下地の硬さの比の影響を図2から4のように示した。

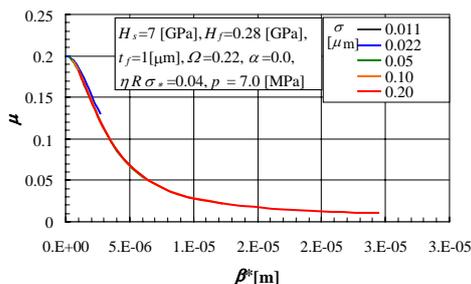


図1 摩擦係数と相関距離の関係：標準偏差の影響

(2) シリコンウェハー上の金の薄膜のせん断

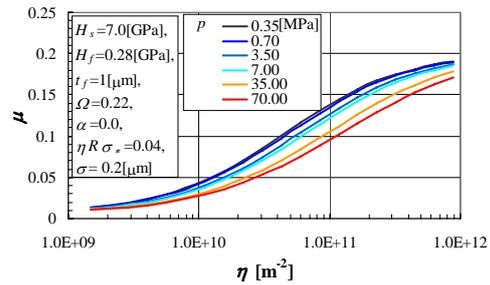


図2 摩擦係数と突起密度の関係：面圧の影響

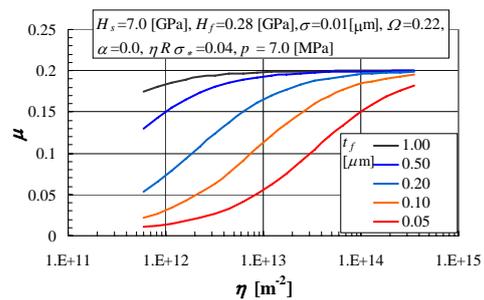


図3 摩擦係数と突起密度の関係：膜厚の影響

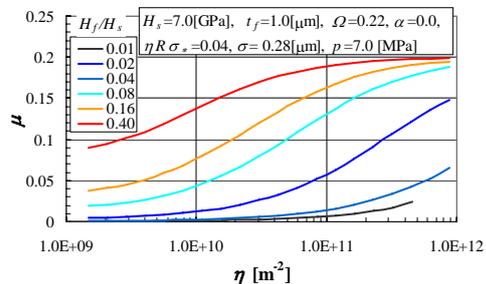


図4 摩擦係数と突起密度の関係：膜厚の影響

強度測定 予備実験として、表面近傍のナノからマイクロメートルスケールの材料強度を測定する技術を確認するために、シリコンウェハーの上に数種類厚さの金の薄膜を蒸着した試験片について、AFMによる摩擦係数測定とナノインデントによる有効硬さの測定から薄膜のせん断強度測定の推定を試みた。

(3) 境界潤滑膜のせん断強度測定 エンジン油に酸化防止と摩耗防止のために用いられている ZnDTP のプライマリとセカンダリの2種類の添加剤を用いて、図5に示すボール・オン・ディスク摩擦試験機 (MTM式：ディスクとボールが独立に回転速度制御可

能)によりしゅう動させて数十ナノメートルの摩擦反応被膜を形成させた。そのときの摩擦係数としゅう動時間の関係は図6のようになった。

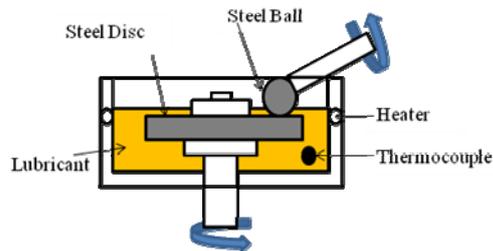


図5 MTM式ボール・オン・ディスク摩擦試験機

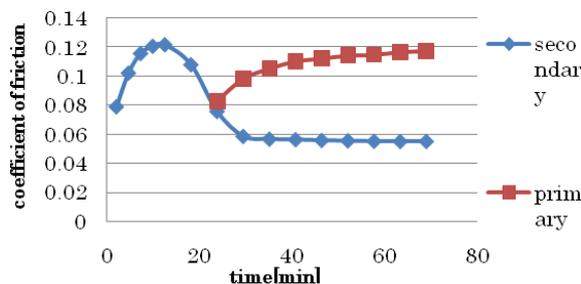


図6 摩擦係数としゅう動時間の関係

その反応被膜についてナノインデントにより計測した硬さと押し込み深さの関係を図7に示す。

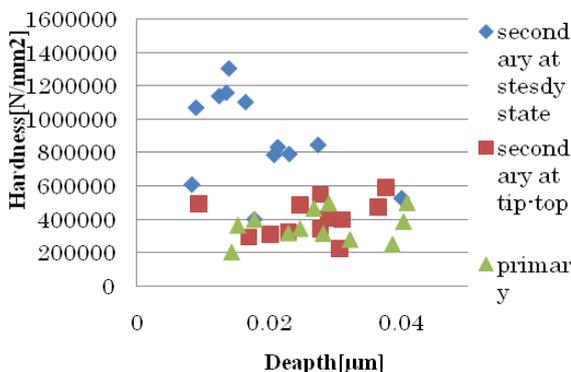


図7 有効硬さと押し込み深さの関係

図6の摩擦係数の定常値と図7の有効硬さから、その薄膜のせん断強度の推定を行った結果、図8のようになり、有効硬さの測定値が安定する押し込み深さが20nm以上で、プライマリ ZnDTP の反応膜の方がセカンダリの反応膜よりせん断強度が高いことがわかる。摩擦係数が定常値に達したときのプライマリ ZnDTP の方がセカンダリの場合より摩擦係数が高いことの原因として従来からプライマリ ZnDTP の反応膜の方がセカンダリ ZnDTP の反応膜よりせん断強度が高いと

推察されていたが、今まで実測による実証はされていなかった。本研究によりそれが実証できたことになる。

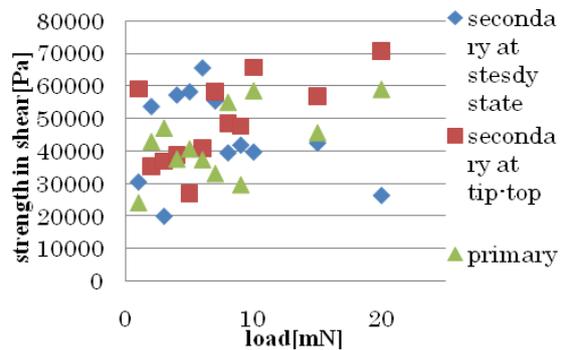


図8 せん断強度と圧子荷重の関係

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

① 中原綱光, 桃園聡, 固体および境界潤滑における摩擦係数に及ぼす粗さパラメータの影響, 日本トライボロジー学会, 2008.9.17, 名古屋

② 中原綱光, 桃園聡, Effects of surface roughness parameters on static friction coefficient of the contact between rough surfaces with soft film on substrate, 13th Nordic Symposium on Tribology, 2008.6.12, Finland, Tampere

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

○取得状況 (計 件)

[その他]

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中原 綱光 (NAKAHARA TSUNAMITSU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 80001625

(2)研究分担者

京極 啓史 (KYOGOKU KEIJI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：70153236

桃園 聡 (MOMOZONO SATOSHI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：70262300

(3)連携研究者

なし